

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Napět'ový střídač pro napájení výukového modelu
asynchronního motoru**

Originál (kopie) zadání BP

Abstrakt

Práce se věnuje návrhu a konstrukci napětového střídače pro napájení výukového modelu asynchronního motoru, nacházejícího se na Katedře elektromechaniky a výkonové elektrotechniky Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni. V úvodu práce je stručně popsáno rozdělení výkonových měničů a princip funkce třífázového napětového střídače s režimy jeho řízení. Dále je popsán postup návrhu a konstrukce konkrétního střídače a jeho budících obvodů včetně návrhu programového vybavení. Závěr práce potom zhodnocuje dosažené výsledky a cíle pokračování práce.

Klíčová slova

Napětový střídač, výukový model, asynchronní motor, pulzně šířková modulace, třífázový motor, řízení rychlosti

Abstract

The thesis focuses on design and development of a DC/AC power inverter for powering a learning model of an asynchronous induction motor that is located on The department of electromechanics and power electronics, University of Western Bohemia, Pilsen. In the beginning of the thesis division of power inverters is listed together with explanation of the three phase DC/AC power inverter working principle and its regulation modes. Next the process of design and development of a specific power inverter and its drivers is described including the software design. The thesis' end then evaluates accomplished results and further progress.

Key words

DC/AC power inverter, learning model, asynchronous induction motor, pulse width modulation, three phase motor, speed regulation

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 21.8.2017

Jan Hentschel

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Luboši Streitovi Ph.D. za ochotnou pomoc a cenné rady, které mi při tvorbě této práce poskytl.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| OBSAH | 7 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK | 8 |
| ÚVOD | 9 |
| 1 TEORIE MĚNIČŮ | 10 |
| 1.1 DRUHY MĚNIČŮ..... | 10 |
| 1.2 PRINCIP NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE..... | 11 |
| 1.3 REŽIMY ŘÍZENÍ NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE..... | 13 |
| 1.4 ŠÍRKOVÉ PULZNĚ MODULOVANÉ ŘÍZENÍ..... | 14 |
| 2 NÁVRH A KONSTRUKCE NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE | 15 |
| 2.1 TABULKA A POPIS PARAMETRŮ..... | 15 |
| 2.2 NÁVRH VÝKONOVÉHO OBVODU..... | 16 |
| 2.3 NÁVRH STEJNOSMĚRNÉHO ZDROJE..... | 17 |
| 2.4 NÁVRH BUDÍČÍHO OBVODU..... | 19 |
| 2.5 NÁVRH OBVODŮ PRO SPRÁVU NAPÁJENÍ..... | 21 |
| 3 MIKROPROCESOR A PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ | 24 |
| 3.1 MIKROPROCESOR TI MSP430G2553..... | 24 |
| 3.2 REALIZACE U/F ŘÍZENÍ STŘÍDAČE POMOCÍ PWM..... | 24 |
| 3.3 REALIZACE KOMUNIKACE S DISPLEJEM..... | 26 |
| ZÁVĚR | 29 |
| SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ | 30 |
| PŘÍLOHY | 1 |

Seznam symbolů a zkratk

| | |
|----------------|---|
| \bar{U} | Fázor elektrického napětí (ukázka veličiny jako fázoru) $[V, ^\circ]$ |
| U | elektrické napětí $[V]$ |
| I | elektrický proud $[A]$ |
| R | elektrický odpor $[\Omega]$ |
| X | reaktance $[\Omega]$ |
| L | indukčnost $[H]$ |
| C | kapacita $[F]$ |
| P | činný výkon $[W]$ |
| Q | jalový výkon $[VAR]$ |
| S | zdánlivý výkon $[VA]$ |
| $\cos \varphi$ | účinník $[-]$ |
| f | frekvence (kmitočet) $[Hz]$ |
| ω | úhlová rychlost $[rad \cdot s^{-1}]$ |
| n | otáčky za minutu $[\min^{-1}]$ |
| M | moment $[N \cdot m]$ |
| F_m | magnetomotorické napětí $[A]$ |
| s | skluz $[-]$ |
| p | počet pólpárů $[-]$ |
| m | počet fází $[-]$ |
| ψ | řídicí úhel $[^\circ, rad]$ |

Úvod

Motivací této bakalářské práce je nutnost realizace řízení výukového modelu třífázového asynchronního motoru, který byl již dříve z důvodů zvýšení praktičnosti výuky elektrických strojů a pohonů zkonstruován Bc. Zdeňkem Frankem na Katedře elektromechaniky a výkonové elektrotechniky Fakulty elektrotechnické v Západočeské univerzitě v Plzni. Cílem práce je tedy navržení a realizace obvodového schématu třífázového napěťového střídače a jeho budících obvodů, implementování U/f řízení střídače, realizace jeho komunikace s displejem, který se již nachází na podstavci motoru a také předváděcího dema.

1 Teorie měničů

1.1 Druhy měničů

V teorii měničů jsou měniče rozděleny na druhy podle určitých kritérií. Předem je však dobré vysvětlit několik pojmů:[1]

Takt - doba mezi dvěma následovnými změnami vodivosti větve měniče. Je označován dvojicí součástek – takt V_1, V_2 je doba po kterou jsou sepnuté součástky V_1 a V_2 .

Komutace měniče – děj v obvodu měniče, charakteristický přechodem proudu z jedné větve do druhé bez přerušení proudu tekoucího uzlem.

Podle způsobu komutace jsou měniče rozlišovány na:

- měníče s vnější komutací - zdroj komutačního napětí není umístěn uvnitř, ale vně měniče. Takový měnič je pak komutován sítí (síťová komutace), nebo zátěží (zátěžová komutace).

- měníče s vlastní komutací - zdroj komutačního napětí se u takovýchto měničů nachází přímo uvnitř měniče.

- bez komutace (s přerušováním proudu)

Podle funkce jsou měniče rozlišovány na:

- usměrňovače - měniče určené k přeměně střídavé elektrické energie na stejnosměrnou.

- střídače - měniče určené k přeměně stejnosměrné elektrické energie na střídavou.

- střídavé měniče napětí - měnič napájený střídavou elektrickou energií, přeměňující velikost střídavého napětí na výstupu.
- střídavé měniče frekvence - měnič napájený střídavou elektrickou energií, přeměňující frekvenci střídavého výstupu.
- stejnoseměrné měniče napětí - někdy nazývané také jako pulzní měniče, jsou napájeny stejnosměrně a mění velikost stejnosměrného výstupního napětí.

Podle možnosti řízení výstupních parametrů jsou měniče rozlišovány na:

- řízené
- neřízené

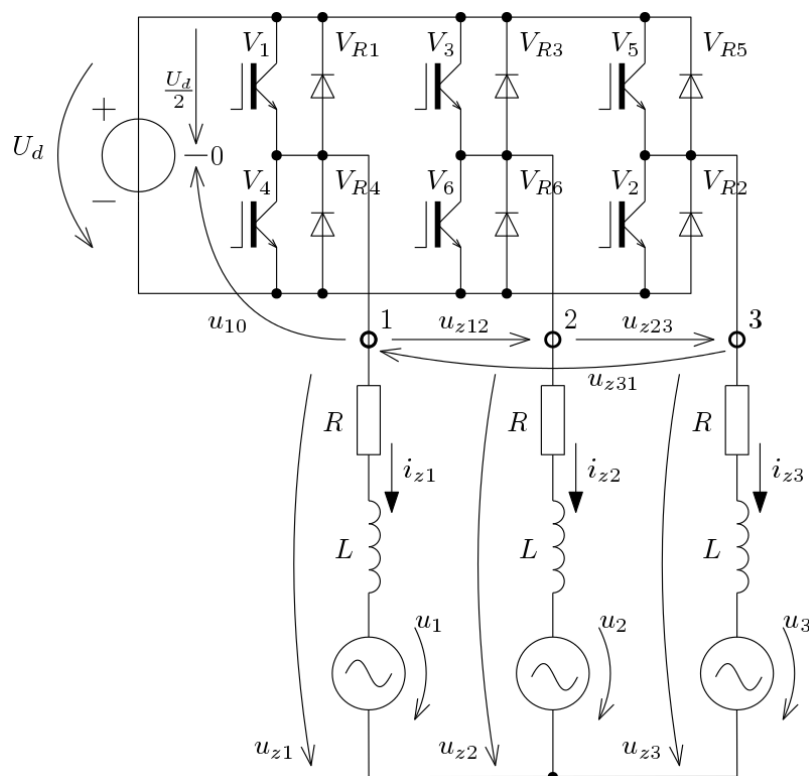
Podle možnosti směru toku energie jsou měniče rozlišovány na:

- jednosměrné
- obousměrné

1.2 Princip napětového střídače

Ke stejnosměrné straně střídače je připojen zdroj napětí U_d , který je uvažován konstantní. Výkon odebíraný zátěží je $P = U_d \cdot I_d$, kde I_d je střední hodnota proudu. Smysl přenosu výkonu je také změněn směrem proudu I_d protože smysl napětí U_d je neměnný. Tím pádem platí $I_d < 0 \Rightarrow P < 0$ pro usměrňovačový chod a $I_d > 0 \Rightarrow P > 0$ pro střídačový chod. Pro vícefázové střídače platí vztah pro okamžité hodnoty $p = m \cdot U_d \cdot i_d$, kde p je okamžitá hodnota výkonu, i_d je okamžitá hodnota proudu a m počet fází střídače. Pokud předpokládáme zátěž odebírající jalový výkon, dosahuje i_d a tedy i p periodicky záporných i kladných hodnot z čehož vyplývá, že střídač musí umožnit průchod proudu oběma směry. Průchod proudu směrem do zátěže v obvodu střídače umožňují vypínatelné

součástky, zatímco průchod proudu zpět do zdroje, tedy odběr jalového výkonu zátěží, umožňují zpětné diody. Ty jsou připojeny antiparalelně k vypínatelným součástkám. Celkově se diody připojené ke každé vypínatelné součástce nazývají zpětný usměrňovač.



Třífázový napěťový střídač je tvořen šesti vypínatelnými součástkami V_1 až V_6 . Ke každé z nich jsou antiparalelně zapojeny zpětné diody V_{R1} až V_{R6} . Zátěž je spojena do uzlu a to buď do hvězdy nebo do trojúhelníku. Každou fází střídače tvoří takzvaný půlmůstek připojený ke stejnosměrnému zdroji U_d , což je spojení dvou výkonových součástek v sérii (např. dvojice V_1 a V_4). První součástka (horní) zajišťuje přivedení proudu k zátěži a druhá (spodní) zase zajišťuje odvedení proudu do zdroje. Do středu mezi tyto dvě součástky (body 1,2 a 3) je potom připojena daná fáze zátěže.[1]

1.3 Režimy řízení napětového střídače

Řízení napětového střídače zahrnuje kromě řízení výstupního kmitočtu střídače téměř vždy také řízení velikosti výstupního napětí, což platí hlavně při řízení rychlosti střídavých elektrických strojů. Při řízení rychlosti například asynchronního motoru frekvencí statoru má zůstat magnetický tok (resp. magnetizační proud I_μ) konstantní. Čili musí být

$$\text{přibližně } I_\mu = \frac{U}{\omega L_\mu} = \text{konst.}, \text{ tedy také } \frac{U}{\omega} = \text{konst.} \quad [1]$$

Proto jsou použitelné tyto režimy řízení střídače:

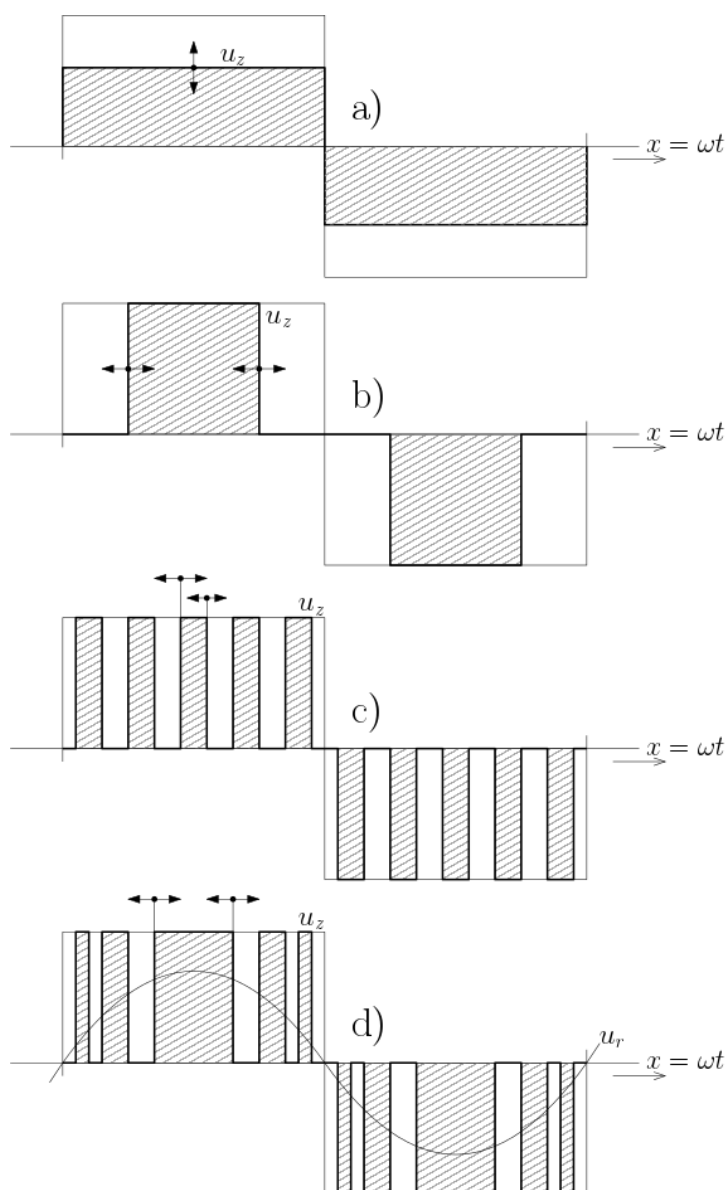
- obdélníkové amplitudové

- obdélníkové šířkové

- šířkové pulzní

- šířkové pulzní modulované

V dnešní době je nejrozšířenějším způsobem řízení střídače šířkově pulzní modulace (dále jen PWM z angl. Pulse width modulation). Obdélníkové řízení je dnes používáno jen velmi zřídka a to jen u aplikací, které jsou nenáročné a není zde požadavek na řízení výstupního napětí.



Obr. 1.1 Režimy řízení napětového střídače a) Obdélníkové amplitudové řízení, b) Obdélníkové šířkové řízení, c) Šířkově pulzní řízení, d) Šířkově pulzně modulované řízení

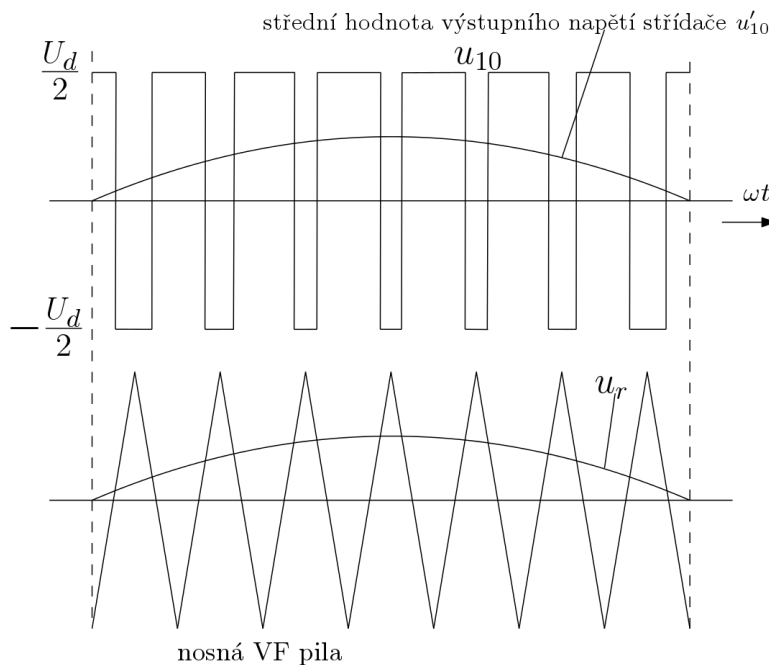
1.4 Šířkové pulzně modulované řízení

Šířkově pulzní modulace, neboli PWM je speciálním druhem šířkově pulzního řízení, kde je proměnná šířka každého impulzu během jedné periody, závislá na časově proměnné hodnotě jiného parametru. Z obr. 1.1 vidíme, že to může být např. sinusový průběh modulující šířku daných pulzů. Takový způsob modulace umožňuje řízení výstupní frekvence střídače.

Principiálně je PWM založena na porovnávání nosného pilového signálu o vysokém kmitočtu s nízkofrekvenčním modulačním signálem, tzv. řídicím napětím u_r . To je vidět z obr 1.2. V okamžiku protnutí nosného a modulačního signálu se přepínají spínací impulzy posílané na součástky. V místech, kde je okamžitá hodnota u_r vyšší, než hodnota pilového signálu, vede např. součástka V_1 a okamžitá hodnota fázového napětí střídače u_{10} je $\frac{U_d}{2}$.

V opačném případě je hodnota překllopena na $-\frac{U_d}{2}$. Výsledná střední hodnota napětí

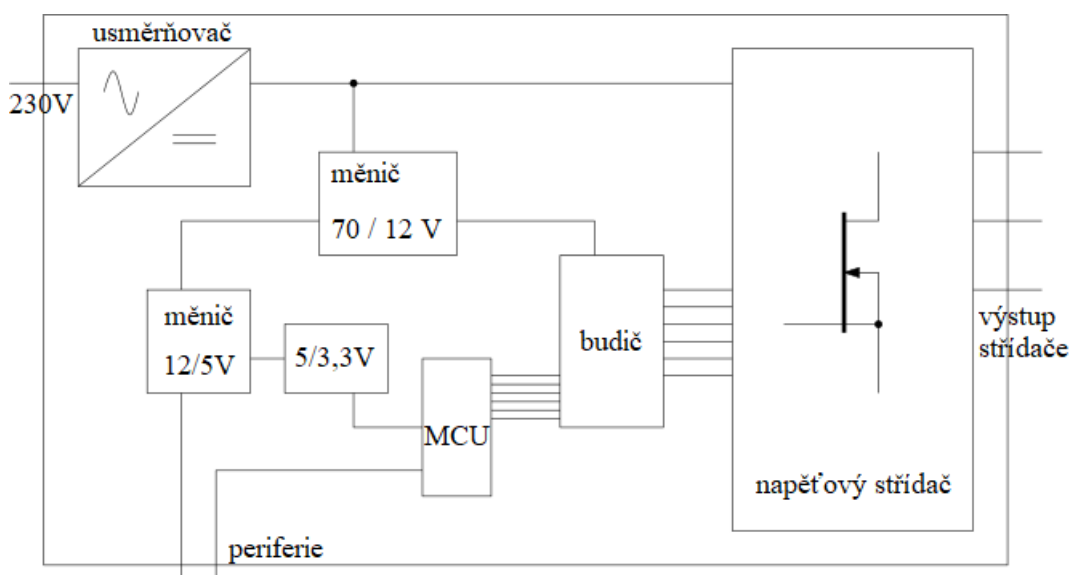
střídače potom odpovídá přibližně hodnotě u_r . Čím vyšší je kmitočet pily oproti modulačnímu signálu, tím je střední hodnota výstupního napětí více podobná původnímu u_r . Z toho je zřejmé, že modulačním napětím se tedy řídí výstupní hodnota jak napětí, tak kmitočtu. [1]



Obr. 1.2 Princip PWM založený na porovnávání nosné pily a u_r

2 Návrh a konstrukce napěťového střídače

Předem návrhu byly vedoucím práce a zhotovením výukového modelu asynchronního motoru již stanoveny některé podmínky, které posloužily, jako základní kameny návrhu střídače. Jsou jimi zvolený mikroprocesor, budič výkonových součástek a samozřejmě parametry motoru, ale i komponenty uvnitř podstavce motoru, kam má být střídač uložen, jako je displej určený ke komunikaci a rozměry podstavce. Protože tyto součásti mají jiné požadavky na své napájení, bylo navrženo několik podružných měničů, upravující napájecí napětí. Blokové schéma všech součástí frekvenčního měniče je k vidění na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Blokové schéma frekvenčního měniče

2.1 Tabulka a popis parametrů

Jako začátek návrhu obvodového schématu střídače a jeho budících obvodů posloužily výsledky měření výukového modelu asynchronního motoru v laboratořích Fakulty elektrotechnické ZČU, které jsou popsány dále v tabulce.

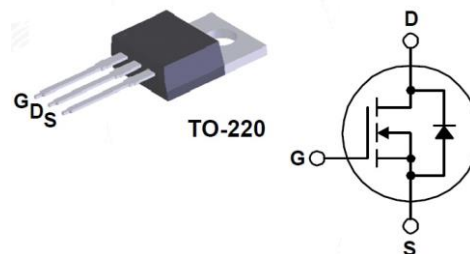
Tabulka 2.1 Tabulka výchozích parametrů výukového modelu asynchronního motoru

| | rotor č.1 | rotor č.2 | rotor č.3 | bez rotoru |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| napětí zdroje U_1 | 48 V | 48 V | 48 V | 48V |
| Frekvence f | 50 Hz | 50 Hz | 50 Hz | 50 Hz |
| efektivní hodnota proudu I_{ef} | 2,3 A | 2,75 A | 2,9 A | 3,1 A |
| maximální hodnota proudu I_m | 3,25 A | 3,89 A | 4,1 A | 4,38 A |
| odebíraný zdánlivý výkon S | 200 VA | 240 VA | 250 VA | 270 VA |
| Účinník $\cos \varphi$ | 0,75 | 0,865 | 0,855 | 0,839 |

Hodnoty proudu zapsané v tabulce jsou měřeny při napájecím napětí motoru 48 V a frekvenci 50 Hz pomocí laboratorních střídavých zdrojů. Proud byl měřen pro všechny 3 výměnné rotory a také pro samotný stator bez rotoru.

2.2 Návrh výkonového obvodu

Ve výkonovém obvodu střídače byly jako výkonové vypínatelné součástky vybrány MOSFET tranzistory FDP52N20 značky Fairchild. Tento tranzistor byl vybrán, pro svou nízkou cenu i přes fakt, že je vzhledem k proudu odebíranému motorem naddimenzován (maximální procházející proud je 52A) a protože již obsahuje zpětnou diodu k odvedení proudu. Součástka je upouzdřena v pouzdře TO-220, což je standardní pouzdro výkonových součástek s kovovými plíškou vhodné pro navrhované uchycení chladiče.

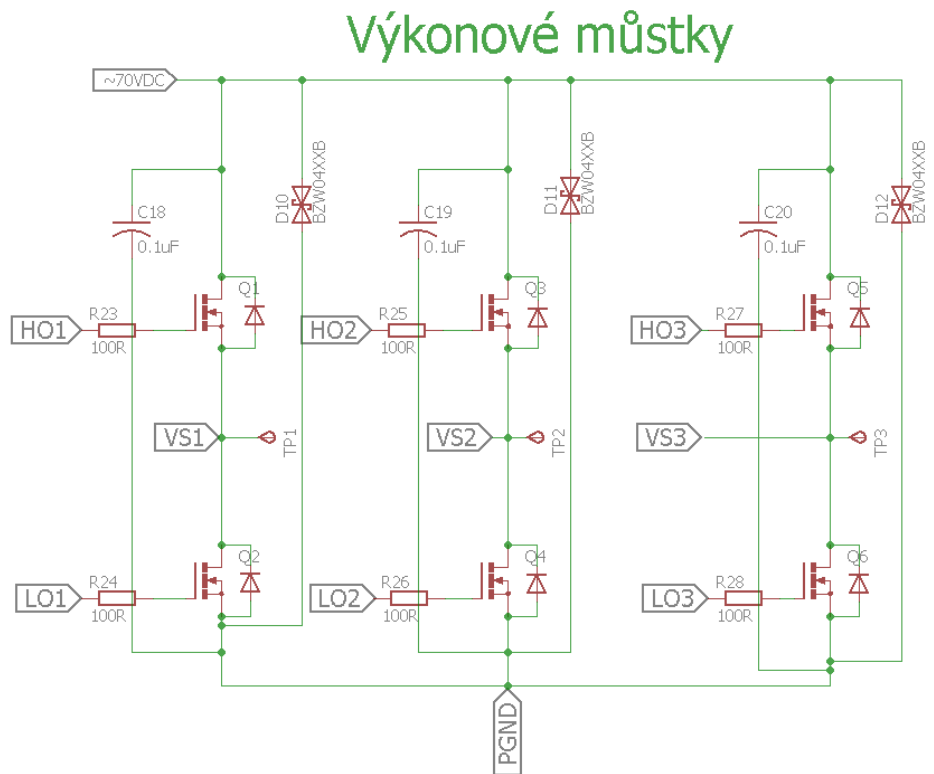


Obr 2.2 Tranzistor FDP52N20 se schematickou značkou

Vybrané tranzistory jsou vhodně naddimenzovány, z důvodu menšího zahřívání součástek průchodem jmenovitého proudu, který je i bez rotoru maximálně okolo 4,3A. Jako přepěťová ochrana výkonového obvodu byly vybrány 3 transily 1.5KE68A (vybavovací napětí 68V) přemostující každou fázi střídače na zem. Hodnota napětí 68V byla vybrána s rezervou nad napětí stejnosměrného zdroje. K můstkům střídače byly také z důvodu zachytávání přechodných jevů paralelně zapojeny svitkové kondenzátory, tzv. snubbery. Jejich hodnota 100nF byla určena s pomocí vedoucího práce.

Na obr. 2.3 je vidět výkonové schéma střídače se svými součástkami. Rezistory R23-28 omezující proud tekoucí gaty byly zvoleny s pomocí vedoucího a jsou to rezistory výrobce

klasifikované jako rezistory vhodné pro spínání rychlých pulzů. Svorky HO a LO označují jednotlivé výstupy horních či spodních spínacích impulsů budiče pro každou fázi střídače. Svorky VS pak označují výstupy jednotlivých fází na zátěž.



Obr. 2.3 Výkonové schéma střídače

Větev ~70VDC označuje zdroj stejnosměrného napětí a větev PGND označuje větev odvádějící proud zpět do zdroje.

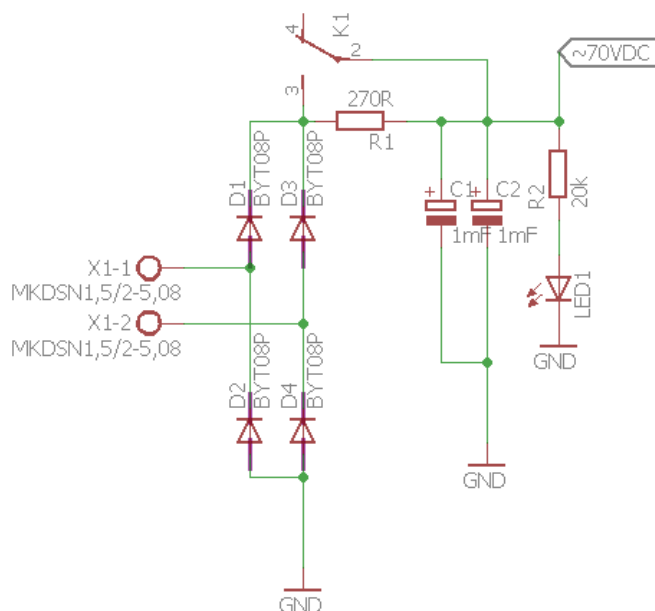
2.3 Návrh stejnosměrného zdroje

Jako zdroj stejnosměrného napětí U_d byl vybrán toroidní transformátor TALEMA 230/48V napájející 2-cestný neřízený můstkový usměrňovač složený ze 4 diod GPA1603. Nábojovou rezervu pak tvoří 2 paralelní kondenzátory o celkové velikosti 2mF.



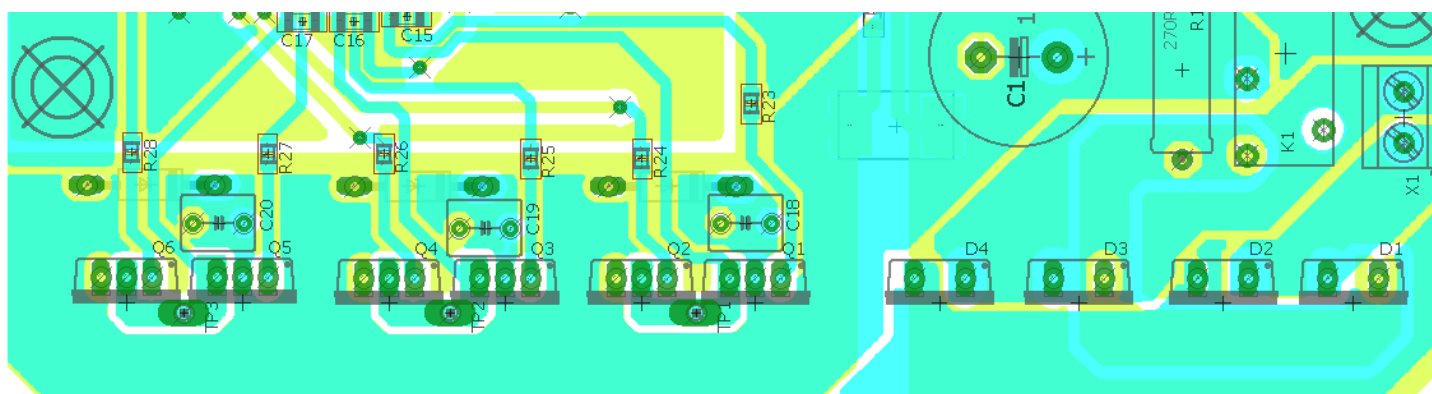
Obr. 2.4 Transformátor TALEMA a dioda GPA1603

Transformátor byl vybrán hlavně podle své nízké ceny a rozměrově úsporné toroidní konstrukci, ale také pro své sekundární napětí 48V, maximální sekundární proud 6,25A a dostatečný výkon 300VA. Usměrnovací diody jsou zase naddimenzovány a to konkrétně napěťově na 200V a proudově na 16A. Upouzdřeny jsou také v pouzdře TO220 kvůli usazení na stejný chladič jako výkonové tranzistory. Velikost vyhlazovacího kondenzátoru byla určena s pomocí vedoucího práce.



Obr. 2.5 Schéma stejnosměrného zdroje

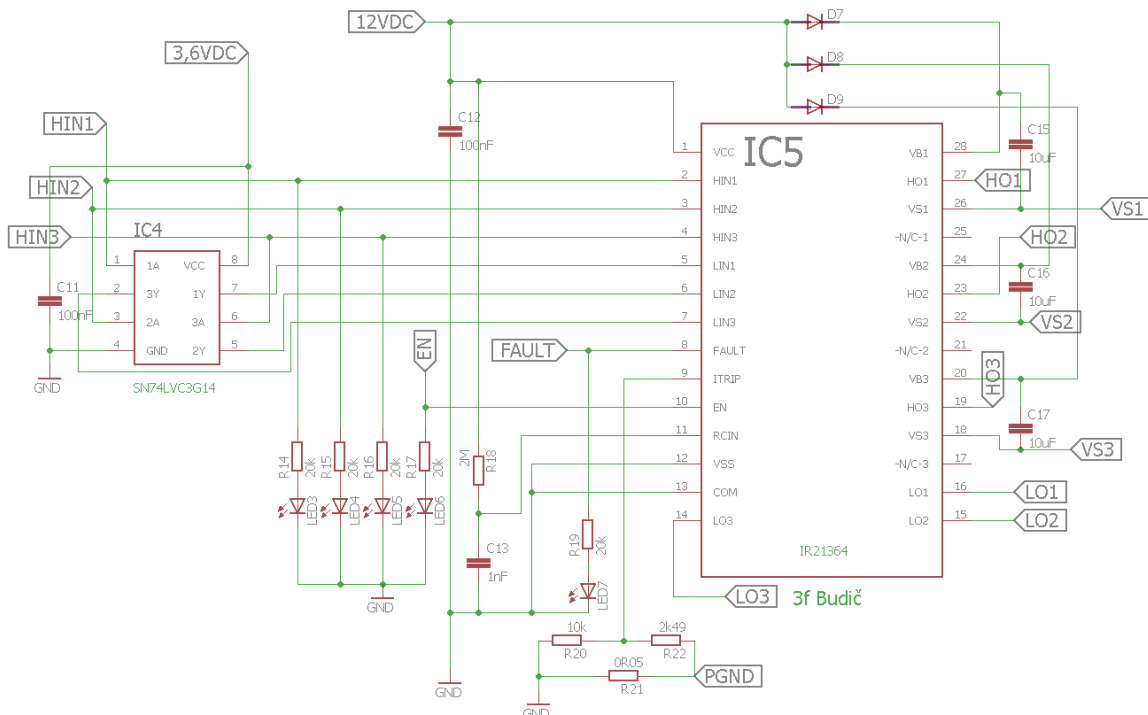
Na obr. 2.5 je vyobrazeno schéma stejnosměrného zdroje napětí U_d . Svorky X1-1 a X1-2 označují sekundární stranu transformátoru. Je zde vidět i signalizace funkce zdroje pomocí LED a řešení přednabíjení kondenzátoru při spuštění střídače. Přívod je nejdříve přemostěn výkonovým odporem z důvodu omezení okamžitého nabíjecího proudu (hodnota byla doporučena vedoucím práce) a posléze je odpor zkratován pomocí relé.



Obr. 2.6 Část návrhu DPS zobrazující zdroj U_d a výkonovou část střídače

Obr. 2.6 zobrazuje výkonovou část návrhu desky plošného spoje, kde je vidět „rozlité“ proudových cest do polygonů, což napomáhá proudové zatížitelnosti obvodu. Vrchní vrstva mědi (tloušťka jedné vrstvy je $18\mu\text{m}$) je značena tyrkysově a spodní vrstva žlutozeleně. Na pravé straně obrázku se nachází přívod z transformátoru, který je pomocí polygonů rozveden k diodovému usměrňovači a poté je přes rezistor či relé usměrněná část spojena s viditelně větším polygonem, který zajišťuje rozvod U_d . Lze si povšimnout i rovinného uspořádání výkonových součástek navrženého ke sdílení chladiče, posazení snubberů a tranzilů v těsné blízkosti výkonových můstků, či gatových rezistorů. Dále je z obr. 2.6 vidět, že bylo v návrhu dbáno i na parazitní vlastnosti výkonového obvodu, jako je parazitní indukčnost obvodu. Tu se návrh snaží potlačit faktem, že jsou polygony určené k vedení velkého proudu rozmístěny tak, aby byla pokud možno přesně vrchní proudová cesta rovnoběžně nad spodní. (Proud jde ze zdroje horním polygonem přes tranzistory do zátěže a vrací se zpět tranzistory spodním, „překrývajícím se“ zelenožlutým polygonem PGND přes měřící rezistor do země.)

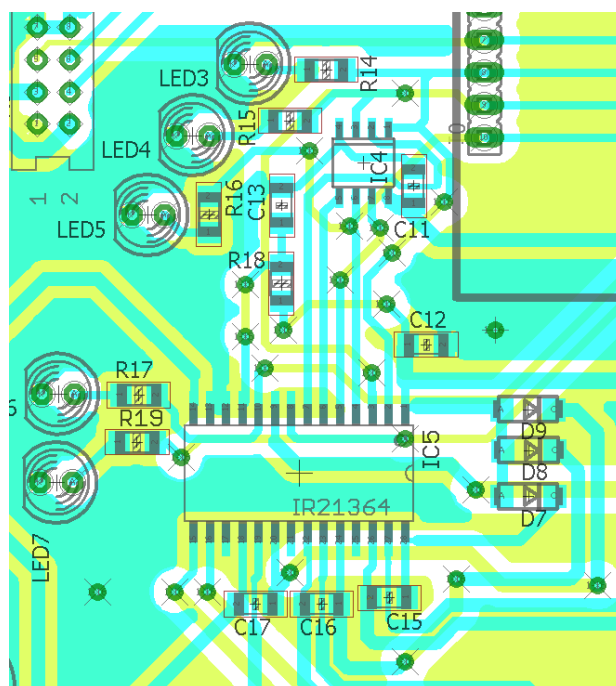
2.4 Návrh budicího obvodu



Obr. 2.7 Schéma obvodu IR21364 a jeho periferií

Pro funkci buzení výkonového obvodu střídače byl s pomocí vedoucího práce vybrán integrovaný obvod INFINEON IR21364, což je třífázový budič. Tzn. obvod schopný posílat na hradla tranzistorů dostatečné proudové impulzy. Obvod je napájen externím napájením, které bylo dle dokumentace výrobce určeno na 12V a pracuje tak, že zpracovává 6 PWM signálů vytvořených procesorem na logické hladině, které zesílí na dostatečnou úroveň pro otevření tranzistorů střídače. Obvod dále obsahuje také signalizaci chodu a poruchy závislé na velikosti proudu. Součástky okolo obvodu IR21364, jako blokovací kondenzátory, nábojové pumpy a blokovací diody jsou navrženy dle aplikační poznámky výrobce a s pomocí vedoucího práce. K obvodu je také připojen trojvstupový invertor, který slouží k zajištění signálů pro sepnutí spodních tranzistorů, blokovací kondenzátor oddělující napájení od zbytku střídače o velikosti 100nF, diody zabráňující průchodu přepětí zpět na napájení, nábojové pumpy každé fáze, signalizace chodu a dělič nastavující hodnotu nadproudu je k vidění na obr. 2.7, stejně tak, jako obvod invertoru, který má vlastní napájení 3,3V a vlastní blokovací kondenzátor. Vstupy HIN1-3 označují vstupy horních PWM signálů, čili výstupy PWM signálů z procesoru.

Na obr. 2.8 je vyobrazena část návrhu desky plošného spoje zahrnující rozmístění budícího obvodu IR21364 a jeho periférií. Blokovací kondenzátory C11 a C12 společně s nábojovými pumpami C15-17 jsou dle konvencí umístěny co nejbližší napájecím pinům daných součástek. Je zase vidět i „rozlití“ napájecích bodů a uzemnění do velkých ploch a také diodová signalizace jednotlivých logických PWM signálů.

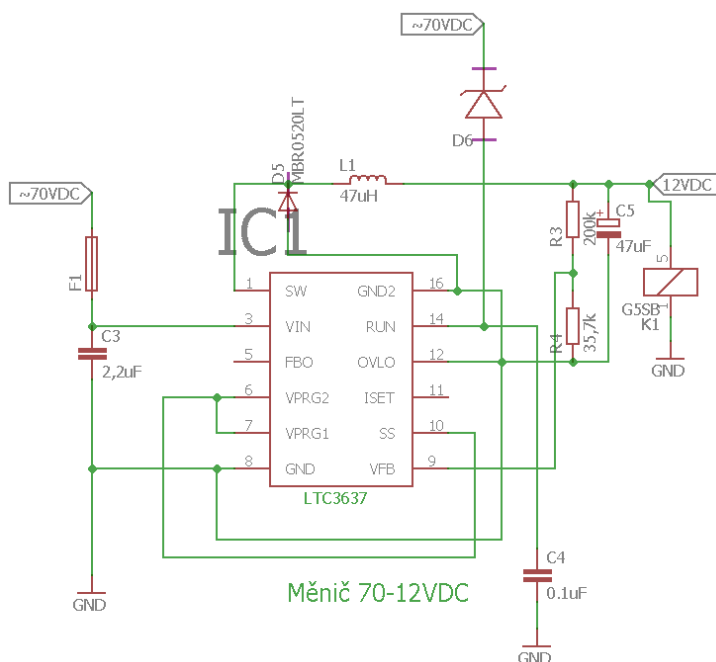


Obr. 2.8 Část návrhu DPS zobrazující budící obvod

2.5 Návrh obvodů pro správu napájení

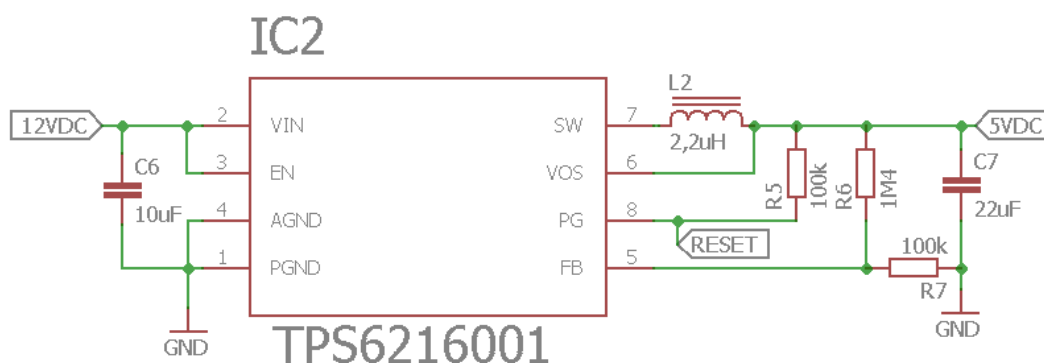
Při návrhu obvodů pro správu napájení se dbalo na několik požadavků. Jsou jimi různá napájecí napětí daných periférií a proud jimi odebíraný. Budič používá napájení 12V, displej v podstavci 5V a mikroprocesor s invertorem 3,3V. Největší proud z periférií odebírá samotný budící obvod (dle výrobce typicky 350mA). Proud odebíraný mikroprocesorem a invertorem (řádově desítky až stovky μA), či displejem (cca. 2 mA) je tedy zanedbatelný. Podružné zdroje jsou navrženy jako kaskádní spojení, jak je vidět již z obr. 2.1 a jako nejjednodušší řešení byly s pomocí vedoucího vybrány nastavitelné integrované obvody pracující jako snižující pulzní měniče.

Budič IR21364 vyžaduje napájecí napětí minimálně 11V, a jako nejuniverzálnější řešení byl zvolen integrovaný obvod LINEAR LTC3637, což je stejnosměrný snižovací pulzní měnič schopný pracovat se vstupem až do 70V a výstupním proudem maximálně 1A. Podle aplikační poznámky výrobce byl zvolen již nabízený návrh zvolení součástek vně integrovaného obvodu, které ho nastavují jako měnič snižující napětí na 12V s maximálním proudem 1A. Návrh zahrnuje vstupní blokovací kondenzátor, cívku vyhlazující proud na výstupu, dělič nastavující výstupní napětí a výstupní vyhlazovací kondenzátor. Pro tuto aplikaci je zmiňovaný návrh z hlediska odebíraného proudu součástkami připojenými ke zdroji 12V naprosto dostačující. V návrhu je zahrnuto i zpožděné sepnutí zdroje pomocí připojení Zenerovy diody (závěrné napětí 43V) k pinu RUN a jištění kaskády napájecích obvodů pojistkou 1A. Sepnutí tohoto zdroje poté sepne cívku dříve zmiňovaného relé přemostňující přednabíjení velkých kondenzátorů usměrňovače. Tento obvod je v kaskádě zapojen po stejnosměrném zdroji U_d jako první.



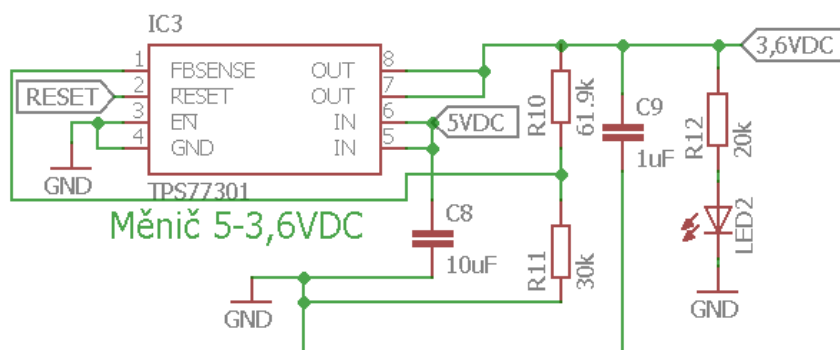
Obr. 2.9 Schéma obvodu LTC3637 v dané aplikaci

Další v řadě je navržen obvod Texas Instruments TPS62160, což je snižovací pulzní měnič s rozsahem vstupního napětí 3 - 17V, který umožňuje i funkci vysílání digitálního signálu procesoru v případě jeho poruchy. Byl vybrán z důvodu cenové dostupnosti. Dle doporučení výrobce byly k obvodu vybrány součástky upravující při vstupu 12V výstup obvodu 5V s maximálním odběrem 1A. Složení periferních součástek je velmi podobné předchozímu zdroji. Tento zdroj je zde nutný pro napájení displeje uloženého v podstavci motoru. Typickou aplikaci výrobce lze vidět na obr. 2.10.



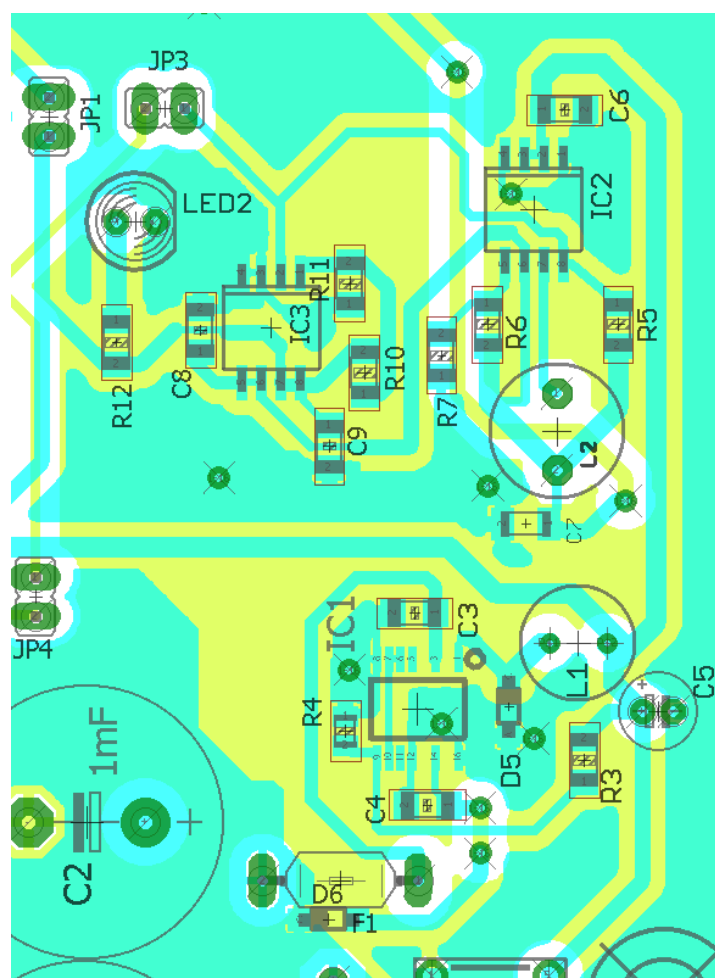
Obr. 2.10 Schéma obvodu TPS62160 v dané aplikaci

Jako poslední obvod upravující výstupní napětí je ve schématu zapojen obvod Texas Instruments TPS77301, který upravuje hodnotu napětí z 5V na 3,3V. To je napětí určené pro napájení procesoru a také invertoru signálů PWM. Návrh součástek nastavujících tento obvod byl inspirován již hotovým návrhem, který je realizován na desce určené k programování a ladění daného procesoru, jako převod napájení z 5V USB na napájení procesoru, což je také jeden z důvodů, proč byl obvod k této funkci vybrán. Jako u předchozích dvou případů je složení periférií poměrně podobné. Výstupní napětí měniče není nastaveno přímo na 3,3V, ale s rezervou na 3,6V kvůli úbytku napětí mezi výstupem měniče a napájením procesoru.



Obr. 2.11 Schéma obvodu TPS77301 v dané aplikaci

Na dalším obrázku je k vidění část návrhu desky plošného spoje zobrazující kaskádu podružných obvodů pro správu napájení. Dole je vidět připojení měniče LTC3637 (IC1) ke zdroji U_a přes pojistku F1. Jeho výstup 12V je poté spojen kromě cívky relé a budiče se vstupem měniče TPS62160 (IC2 vpravo nahoře), jehož 5V výstup poté napájí displej v podstavci motoru a zdroj 3,6V (IC3). Při návrhu byly dodržovány základní návrhářské postupy, zvyšující efektivitu aplikace daných součástek, jako je blízkost blokovacích kondenzátorů pinům napájení nebo potlačení dalších parazitních vlivů, vyvarováním se pravých úhlů při návrhu vodivých cest a navrhováním cest pod úhlem 45° . Velká část volného prostoru desky byla také na obou stranách využita rozlitím polygonů mědi, které jsou pospojovány a tvoří uzemnění celého obvodu. Slouží také jako dodatečný tepelný odvod.

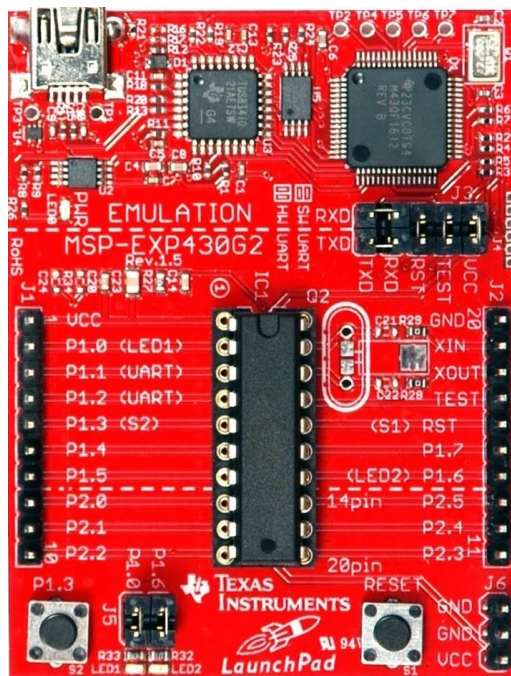


Obr. 2.12 Část návrhu desky plošného spoje zobrazující obvody pro správu napájení

3 Mikroprocesor a programové vybavení

3.1 Mikroprocesor TI MSP430G2553

Předem návrhu práce byla vedoucím určena klíčová součást střídače, mikroprocesor vytvářející PWM signály potřebné ke spínání tranzistorů. Je jím mikroprocesor značky Texas Instruments MSP430G2553. Procesor byl zvolen vhodně s vývojovou deskou, neboli launchpadem (MSP-EXP430G2), pomocí kterého lze mikroprocesor ladit pomocí USB. Procesor je napájen napětím 3,3V a je primárně navrhován pro energeticky úsporné aplikace. Obsahuje 2 digitální osmibitové porty, možnost seriové komunikace, 2 šestnáctibitové čítače a desetibitový analogově digitální převodník.



Obr. 3.1 Launchpad MSP-EXP430G2 s procesorem MSP430G2553

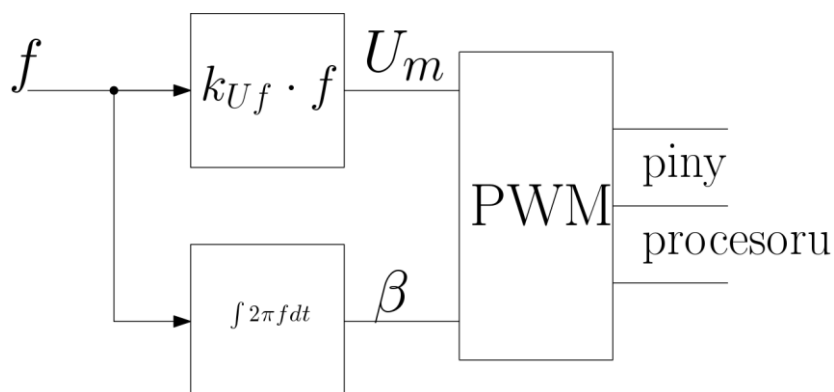
Každý z pinů jednotlivých portů může být nastaven jako vstup nebo výstup. S dvěma osmibitovými porty je tedy celkem 16 využitelných vstupně/výstupních pinů pro potřebné aplikace. Jimi jsou hlavně vysílání PWM pulzů budiči a komunikace s displejem v podstavci, zahrnující ovládání tlačítka. Mikroprocesor je v návrhu řešen jako připojitelná komponenta pomocí patice pro připojení celého launchpadu k desce plošného spoje. Je navržena i možnost odpojení určitých ladících pinů procesoru nebo napájení v průběhu ladění pomocí jumperů přemostřujících dané cesty DPS. Programové vybavení procesoru je navrženo v programovacím jazyce C.

3.2 Realizace U/f řízení střídače pomocí PWM

Jak je již dříve zmíněno, signály pro spínání spodních tranzistorů jsou v návrhu řešeny invertováním horních signálů pomocí diskretní součástky, takže tato aplikace zabere pouze 3 piny jednoho portu.

U/f řízení střídače je programově řešeno jako skalární řízení střídače s otevřenou smyčkou (bez zpětné vazby),

tedy bez senzoru rychlosti. Frekvence je pomocí tlačítek a displeje v podstavci motoru zadávána uživatelem pouze jako požadavek a hodnota frekvence není kontrolována.



Obr. 3.2 diagram bezsenzorového U/f řízení střídače

Hodiny procesoru jsou základně nastaveny na taktovací frekvenci 1MHz. Spínací frekvence pilového signálu pro PWM byla vedoucím práce stanovena na 5kHz a je z taktovací frekvence odvozena pomocí čítače uvnitř procesoru. Ten je nastaven tak, aby mu každý takt procesoru připočetl hodnotu a při přetečení určité hodnoty se čítač vynuloval a vyvolal přerušení procesoru. Při taktovací frekvenci 1MHz (doba 1 cyklu je 1 μ s) je tedy pro spínací frekvenci 5kHz potřeba cyklů 200 (200 μ s). Přerušení neboli interrupt je stav, kdy za určité podmínky (přetečení čítače) procesor odskočí z hlavního běhu programu a vykoná kus kódu interruptu přiřazený. Jelikož interrupt časovače proběhne každých 200 cyklů, je tedy vhodné počítat výpočty potřebné pro řízení PWM zde.

Běh přerušení poté probíhá takto: Z podílu maximální statorové frekvence (50Hz) a maximálního napětí (70V) je nejprve spočítána konstanta k_{Uf} , což je směrnice křivky, po které bude se vzrůstající frekvencí vzrůstat výstupní napětí střídače, čili pro každou zadanou frekvenci zůstane konstantní poměr U a f a tedy i magnetizační proud motoru. Poté se spočte amplituda aktuální hodnoty napětí, jako $U_m = f \cdot k_{Uf}$. Je také potřeba integrovat úhel β vytvářející fázor napětí o požadované výstupní frekvenci.

Tento úhel beta se spočte jako: $\beta = \int 2\pi \cdot f dt$. V kódu je tento integrál interpretován jako inkrementace proměnné a dt je pevně daný element času – perioda spínací frekvence. Dále se spočtou jednotlivá okamžitá napětí fází jako $u_1 = U_m \cdot \cos \beta$ a $u_{2,3} = U_m \cdot \cos \beta \pm \frac{2\pi}{3}$. Ty se dále porovnávají, zda spadají do intervalu $\langle -U_{\max}, U_{\max} \rangle$ a pokud ano, je spočtena střída potřebná pro tuto hodnotu středního napětí PWM, jako $t_{sep.1} = \frac{u_1 \cdot t_{pily}}{2U_{\max}} + \frac{t_{pily}}{2}$. Body ve kterých jsou jednotlivé fáze spínány, jsou pak začátek přerušení, kde lze piny zapnout, (jelikož se zde pilový průběh vrací na nulu) a uvnitř nekonečné smyčky v hlavním kódu programu. Zde je pro každou fázi porovnána doba sepnutí spočtená v přerušení a aktuální hodnota čítače. Pokud je aktuální hodnota čítače vyšší, procesor pin vypne.

3.3 Realizace komunikace s displejem

Displej použitý v projektu je standardní dvojřádkový, 16-ti znakový displej ATM1602-B napájený napětím 5V. Ovládacími prvky jsou 4 tlačítka. Displej obsahuje 8 datových pinů a 3 piny komunikační. Z důvodu úspory pinů procesoru byla použita pouze 4-bitová komunikace procesoru s displejem namísto osmibitové, čímž je použito pouze 7 pinů procesoru místo 11. Celý displej je nejprve na začátku programu nutno inicializovat. Displej ale stále pracuje s 8-bitovými slovy, takže je nutno je posílat po čtyřbitových půlkách. Inicializace probíhá tak, že se nejdříve na displej pošle instrukce zajišťující 4-bitovou komunikaci a poté sada instrukcí k vymazání displeje a nastavení pozice kurzoru na počátek. Poté je displej schopen přijímat data k zobrazení. Zde je kus kódu použitý k inicializaci LCD:

```
void lcd_init(void)
{
  P1DIR |= 0xFF; //Pin 1 směr výstup
  P1OUT &= 0x00; //Pin 1 vypnuto
  send_command(0x33);
  send_command(0x32);
  send_command(0x28); // 4 bitová komunikace
  send_command(0x0E); // vymazání displeje
  send_command(0x01); // zapnutí displeje, zobrazení kurzoru
  send_command(0x06); // inkrementovat kurzor
  send_command(0x80); // řádek 1 sloupec 1
}
```

Ovládání pomocí tlačítek je řešeno tak, že na portu 2 jsou piny 3,4,5 a 6 nastaveny jako vstupní. Tlačítka jsou potom uzemněna a sepnutý stav je zaregistrován, jelikož sepnutím tlačítka se přes interní rezistor, tzv. Pull-up pinu nastaví logická 1. Samotné přiřazení zaregistrované 1 do proměnné je pak realizováno v kódu externího interruptu portu. Reálné tlačítko však také kmitá, a tak může dojít k zaregistrování více stisků. To řeší tzv. debounce (potlačení odskoku). Může být realizován externě pomocí filtru, nebo interně kódem. Zde je kus kódu s externím přerušením portu:

```
#pragma vector=PORT2_VECTOR
__interrupt void Port2_ISR (void)
{
    switch (P2IFG & (BIT3 + BIT4 + BIT5 + BIT6))
    {
        case BIT3:{
            delay(5);
            if(P2IN & BIT3)
            {
                tlac = 1; //t1. 1 stisknuto
            }
            P2IFG = P2IFG & ~BIT3; //vyčištění interrupt flagu
        }
        break;
        case BIT4: {
            delay(5);
            if(P2IN & BIT4)
            {
                tlac = 2; //t1.2 stisknuto
            }
            P2IFG = P2IFG & ~BIT4;
        }
        break;
        case BIT5:{
            delay(5);
            if(P2IN & BIT5)
            {
                tlac = 3;
            }
            P2IFG = P2IFG & ~BIT5;
        }
        break;
        case BIT6:{
            delay(5);
            if(P2IN & BIT6)
            {
                tlac = 4;
            }
            P2IFG = P2IFG & ~BIT6;
        }
        break;
        default:
        break;
    }
}
```

Menu je řešeno pomocí funkce switch(proměnná), která funguje jako přepínač. Jejím vstupem je proměnná tlac a rozhodovat se může ze 4 možností (nahoru, dolů, vpřed a zpět). V každém z těchto rozhodnutí je další přepínač, který se ale rozhoduje podle toho, jaký řádek aktuálně displej zobrazuje. Ukázka kódu ovládání menu stisk tlačítka „nahoru“:

```
switch(tlac)
{
  case 1:{ //tlacitko nahoru
    switch(radek)
    {
      case 1:{
      }
      break;
      case 2:{
        send_command(0x0E); //vymaž displej
        send_command(0x80); //řádek 1 sloupec 1
        send_string("ROZBEH ");
        send_command(0x06);
        send_data(0x7E); //znak šipka
        send_command(0xC0);
        send_string("Zmena f ");
        send_command(0x06); //posun kurzoru
        send_data(0x7F);
        radek = 1;
      }
      break;
      case 3:{
        send_command(0x0E); //vymaž displej
        send_command(0x80); //řádek 1 sloupec 1
        send_string("Zmena f ");
        send_command(0x06);
        send_data(0x7E);
        send_command(0xC0);
        send_string("BRZDA ");
        send_command(0x06); //posun kurzoru
        send_data(0x7F);
        radek = 2;
      }
      break;
      case 4:{
        send_command(0x0E); //vymaž displej
        send_command(0x80); //řádek 1 sloupec 1
        send_string("BRZDA ");
        send_command(0x06);
        send_data(0x7E);
        send_command(0xC0);
        send_string("DEMO ");
        send_command(0x06); //posun kurzoru
        send_data(0x7F);
        radek = 3;
      }
      break;
    }
  }
  break;
}
```

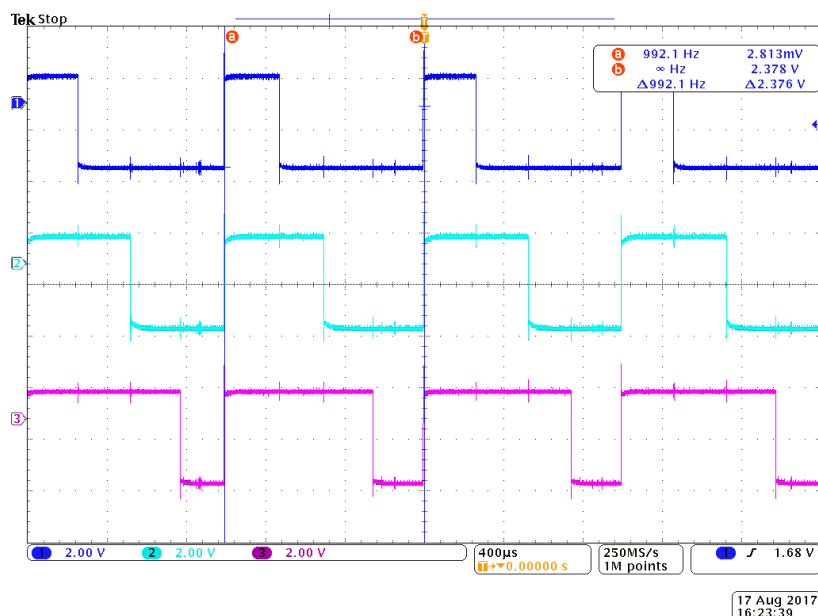
Závěr

V první části práce byla krátce popsána teorie výkonových měničů, jako jejich druhy, princip napětového střídače a režimy řízení střídače.

Dále pak byl rozebrán návrh obvodů střídače, jako zdroj stejnosměrného napětí, výkonový obvod, budicí obvod a podružné obvody pro správu napájení, spolu s částmi návrhu desky plošného spoje.

V poslední části byl pak stručně popsán vybraný mikroprocesor a rozebrán návrh programového vybavení realizující zadané aplikace, jako je U/f řízení střídače a 4-bitová komunikace mikroprocesoru s LCD displejem.

K závěru práce se chci odkázat na poslední bod zadání práce a to je ověřit experimentální běh měření. Dosud bylo možno experimentálně ověřit programové vybavení procesoru, konkrétně funkci displeje, ovládání tlačítka a piny zajišťující 3 PWM signály. V laboratořích FEL byly změřeny průběhy pro každou fázi, které jsou vidět na obr. 4.1. Horní průběh ukazuje PWM se střídou 25%, prostřední střidu 50% a spodní 75%.



Obr. 4.1 Naměřené průběhy PWM výstupů procesoru

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VONDRÁŠEK, František. Výkonová elektronika, Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-485-9.

Přílohy

Příloha A – U/f řízení střídače pomocí PWM

Kód přerušení:

```
#pragma vector=TIMER1_A0_VECTOR
__interrupt void Timer1_A0_ISR (void)
{
    P2OUT |= (BIT0 + BIT1 + BIT2); //zapni pwm piny set 1
    int K uf = (((long)U_MAX<<13)/8192); //konstanta U/f, 8192 - max hodnota f
    u_m=(((long)f * K uf)>>13); //amplituda napětí
    if((f!=0)&&(f<82)) u_m+= 409; //nastavení napětí.offsetu v oblasti f blízko 0
    if(u_m>U_MAX) u_m = U_MAX; //limitace napětí na max hodnotu
    beta += ((long)f*BETA_KONST ) >> 15; //integrace úhlu beta

    u_1 = ((long)u_m * _Q15cos(beta)) >>15;
    if (u_1 >= U_MAX) comp_u1 = TA1CCR0;
    else if (u_1<= (0-U_MAX)) comp_u1 = 0;
    else comp_u1 = (((long)TA1CCR0*u_1 )/U_MAX2) + (TA1CCR0>>1));

    u_2 = ((long)u_m * _Q15cos(beta + _2PI3)) >>15;
    if (u_2 >= U_MAX) comp_u2 = TA1CCR0;
    else if (u_2<= (0-U_MAX)) comp_u2 = 0;
    else comp_u2 = (((long)TA1CCR0*u_2 )/U_MAX2) + (TA1CCR0>>1));

    u_3 = ((long)u_m * _Q15cos(beta - _2PI3)) >>15;
    if (u_3 >= U_MAX) comp_u3 = TA1CCR0;
    else if (u_3<= (0-U_MAX)) comp_u3 = 0;
    else comp_u3 = (((long)TA1CCR0*u_3 )/U_MAX2) + (TA1CCR0>>1));
}
```

Kód v nekonečné smyčce:

```
while(1)
{
    //_BIC_SR(GIE);
    if( ((P2OUT & BIT0)==BIT0) && (TA1R >= comp_u1 ) )
    {
        P2OUT &= ~BIT0;
        //vypni l1, nastav bit pro prvni fazi do nuly
    }

    if( ((P2OUT & BIT1)==BIT1) && (TA1R >= comp_u2) )
    {
        P2OUT &= ~BIT1;
        //vypni l2, nastav bit pro druhou fazi do nuly
    }

    if( ((P2OUT & BIT2)==BIT2) && (TA1R >= comp_u3 ) )
    {
        P2OUT &= ~BIT2;
        //vypni l3, nastav bit pro treti fazi do nuly
    }
}
```